



CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DE RESÍDUOS DE EUCALYPTUS SP E PINUS SP PARA UTILIZAÇÃO COMO COMBUSTIVEL SÓLIDO

*Walbert Chrisostomo; **Fábio Minoru Yamaji; ***Antonio José Felix de Carvalho; ****Carlos Roberto Sette Junior

*Doutorando em Engenharia de Materiais – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. w.chrisostomo@usp.br

** Professor Doutor – Universidade Federal de São Carlos, *Campus* Sorocaba. fmyamaji@ufscar.br

***Professor Doutor – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. toni@sc.usp.br

****Professor Doutor – Universidade Federal de São Carlos, *Campus* Sorocaba. crjunior@esalq.usp.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade de combustíveis sólidos (briquetes), produzidos a partir da compactação de serragem de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*. Os resíduos foram compactados nas mesmas condições de tamanho de partículas (granulometria de 20 a 40 mesh) e teor de umidade (10% base seca). A compactação foi realizada em uma prensa hidráulica, sem aquecimento. A pressão de compactação utilizada no processo foi de 1250 kgf.cm⁻² e o tempo de aplicação da carga máxima de 15 segundos. A produção dos briquetes foi possível com os dois tipos de materiais utilizados. Os briquetes produzidos apresentaram densidades que variaram entre 852 e 872 kg.m⁻³. Isso representou uma redução de volume de 6,01 vezes para o eucalipto e 5,28 vezes para o pinus. A expansão longitudinal dos briquetes foi de 9,44% para o eucalipto e 10,76% para o pinus. Os resultados dos ensaios de tração diametral foram de 1,01MPa (eucalipto) e 0,45MPa (pinus). O poder calorífico superior (PCS) encontrado foi de 4675 kcal.kg⁻¹ (pinus) e 4436 kcal.kg⁻¹ (eucalipto). Os resultados mostraram que tanto a serragem de *Eucalyptus sp*, como também a serragem de *Pinus sp* podem ser utilizadas na produção de briquetes e que a produção dos briquetes foi possível através da compactação sem aquecimento. A serragem de *Pinus sp* apresentou as melhores propriedades químicas para a utilização como combustível sólido. Por outro lado, os briquetes produzidos a partir da compactação da serragem de *Eucalyptus sp* apresentaram maior resistência mecânica em comparação com os briquetes de *Pinus sp*. O processo de compactação melhorou a qualidade do biocombustível sólido.

Abstract

Characterization and Compaction of Residues Eucalyptus sp and Pinus sp For Use as a Solid Fuel

This study aimed to evaluate the quality of solid fuels (briquettes) produced from the compression of sawdust of *Eucalyptus spp* and *Pinus sp*. The residues were compressed under the same conditions of particle size (particle size 20-40 mesh) and moisture content (10% dry basis). The compression was performed in a hydraulic press, without heating. The compaction pressure was used in the 1250 kgf.cm⁻² and the time of application of the maximum load of 15 seconds. The production of briquettes was possible with both types of materials used. The briquettes produced had densities ranging between 852 and 872 kg.m⁻³. This represented a volume decrease of 4 times to 3 times the eucalyptus and pine for. The longitudinal expansion of the briquettes was 9.44% to 10.76% for eucalyptus and pine. The results of tensile tests were diametrical 1.01 MPa (eucalyptus) and 0.45 MPa (pine). The calorific value (GCV) was found in 4675 kcal.kg⁻¹ (pine) and 4436 kcal.kg⁻¹ (eucalyptus). The results showed that both the sawdust of *Eucalyptus sp*, as well as pine sawdust may be used in the production of briquettes and the production of briquettes was possible by compression without heating. The sawdust of *Pinus sp* showed the best chemical properties for use as solid fuel. Furthermore, the briquettes produced from the compression of sawdust of *Eucalyptus sp* had higher mechanical strength compared with the briquettes *Pinus sp*. The compacting process improved the quality of solid biofuel.



INTRODUÇÃO

O aproveitamento térmico da biomassa vegetal é uma forma relativamente barata e tecnologicamente viável de produzir energia, principalmente no que se relaciona à utilização dos seus resíduos. Um resíduo lignocelulósico pode ser aproveitado como matéria-prima em um processo diferente daquele de origem, podendo ser utilizado como combustível na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em geradores ou termelétricas (QUIRINO, 2003).

O que dificulta a utilização de resíduos gerados a partir de processos agroindustriais para a geração de energia são as propriedades e as condições em que estão disponíveis: baixa densidade, alta umidade, tamanho e formato geométrico das partículas indesejado. O alto teor de umidade dos resíduos diminui o seu poder calorífico, a heterogeneidade das partículas dificultam o controle de queima e sua baixa massa específica aumenta o custo de transporte e armazenamento, inviabilizando a sua utilização (LI; LIU, 2000).

Para aumentar a eficiência energética desses resíduos e facilitar o seu transporte e armazenamento é necessário corrigir algumas dessas propriedades através de processos industriais. Os resíduos da biomassa podem ser transformados em partículas menores através de processos mecânicos, ou ainda, compactados na forma de briquetes e *pellets* sendo utilizados como combustíveis sólidos, para a produção de energia (VALE; GENTIL, 2008).

O processo de compactação consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com objetivo de torná-las um sólido compacto de alta densidade. Qualquer tipo de resíduo lignocelulósico pode ser compactado, desde que esteja nas condições adequadas exigidos pelo processo de compactação. A compactação da biomassa melhora, de forma significativa, a qualidade energética da matéria-prima. A compactação é muito utilizada nos países industrializados, onde as matérias-primas se constituem principalmente de sobras de madeira (WAMUKONYA; JENKINS, 1995).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar e avaliar a qualidade de combustíveis sólidos (briquetes), produzidos a partir da compactação de serragem de *Eucalyptus sp* e serragem *Pinus sp*.

MATERIAL E MÉTODOS

As serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* utilizadas neste trabalho foram coletadas em uma empresa produtora de paletes e embalagens de madeira no município de Itapetininga/SP. As serragens coletadas foram armazenadas em sacos plásticos lacrados, para conservar suas condições físicas até o momento das análises.

As análises e os ensaios deste trabalho foram realizados nos Laboratórios de Processos Industriais e Pesquisa em Polímeros e Materiais Lignocelulósicos da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, *Campus Sorocaba/SP*. A análise do poder calorífico superior (PCS) dos briquetes produzidos foram realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade da empresa Unimetal Indústria, Comércio e Empreendimentos.

Caracterização das serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*

O conhecimento das propriedades físico-química de um material é essencial para poder avaliar o seu potencial como combustível. Para a realização da caracterização das serragens, as mesmas foram picadas em um micro-moinho de facas tipo Wiley, separadas em peneiras com malhas de aberturas progressiva e em seguida secas em estufa (105 ± 2) °C até massa constante. A granulometria utilizada nas caracterizações foi entre 40 mesh (0,42 mm) e 60 mesh (0,25 mm).

Densidade a granel

A massa específica a granel das serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* foram determinadas, utilizando a metodologia prescrita na norma NBR 6922, para carvão vegetal. Foi utilizado um béquer de 2 litros de capacidade e uma balança eletrônica de precisão. A densidade foi calculada dividindo-se o peso das serragens pelo volume do béquer. A densidade a granel das serragens foram determinadas nas condições de tamanho de partículas e teor de umidade em que foram coletadas. Essa é a densidade que deve ser considerada para comparação com a das serragens compactadas, na forma de briquetes.



Análise química imediata

A análise química imediata de um combustível determina o teor de água do material (umidade), o teor de material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), e também o teor de material residual após a combustão (cinzas). A análise imediata das serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* foram realizadas tendo como referência a norma NBR 8112.

Teor de lignina Klason insolúvel

O teor de lignina Klason insolúvel das serragens foram determinados pelo método TAPPI T222 om-98. Foram utilizados na análise aproximadamente 1,0000g de amostra livre de extrativos e isenta de umidade.

Preparação das serragens para a compactação

As serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* foram compactadas com as mesmas condições de tamanho de partículas e teor de umidade. Para isso as mesmas foram picadas em um micro-moinho de facas tipo Wiley e separados em peneiras com abertura de malha progressiva. Foi selecionada para a compactação a fração que passou pela peneira de 20 mesh (0,84 mm) e que ficou retida na peneira de 40 mesh (0,42 mm). As frações das serragens selecionadas foram secas em estufa (105 ± 2)°C até massa constante. A partir do material seco (aproximadamente 0% de umidade) foi calculada a quantidade de água necessária para atingir 10% de umidade (base seca) e adicionado as serragens. Após a adição de água as serragens foram acondicionadas em saquinhos plásticos durante 24 horas.

Compactação das serragens

A compactação e produção das amostras de briquetes foram realizadas em uma prensa hidráulica, modelo MA/098CP, com capacidade de 15 toneladas. As amostras das serragens compactadas foram produzidas em um molde cilíndrico de aço inoxidável, com diâmetro interno de 35 mm. Foram utilizados 20,0 gramas de serragem na compactação e produção de cada amostra. A pressão utilizada no processo de compactação foi de 1250 kgf.cm^{-2} e o tempo de aplicação da pressão máxima foi de 15 segundos para a formação de cada amostra. O processo de compactação dos resíduos foi realizado sem o uso de aquecimento.

Caracterização dos briquetes

A qualidade dos briquetes é avaliada por meio de suas propriedades, baseada em seu comportamento durante o seu transporte, armazenamento e utilização como combustível. Os briquetes de serragem de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* foram caracterizados através dos ensaios de densidade aparente, resistência à tração por compressão diametral e poder calorífico superior.

Densidade aparente

Foi determinada a densidade média dos briquetes para calcular a redução de volume (grau de compactação) das serragens. As amostras foram pesadas em uma balança analítica e medidas com um paquímetro digital, 72 horas após a compactação. A densidade aparente foi determinada através do quociente entre a massa e o volume de cada briquete.

Resistência à tração por compressão diametral

A resistência dos briquetes à compressão foi determinada para analisar seu comportamento mecânico quando submetido a uma determinada carga ou esforço. O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma máquina universal de ensaios, com capacidade máxima de 30.000 kgf (300 kN), modelo DL 30.000, 72



horas após a compactação das serragens. A carga foi aplicada no sentido transversal dos briquetes, perpendicular à pressão de compactação (Figura 1). A velocidade da aplicação da carga utilizada para este ensaio foi de 3 mm/min.

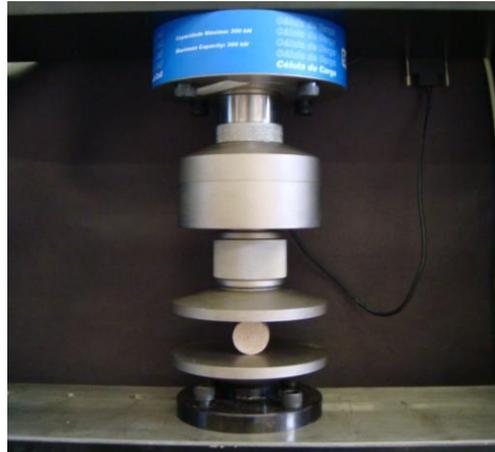


Figura 1 – Máquina Universal no momento do ensaio do briquete
Figure 1 - Universal testing machine showing the test in briquette

Poder calorífico

O poder calorífico é uma importante característica dos combustíveis e refere-se à quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de um combustível. O poder calorífico superior (PCS) dos briquetes foi determinado após a compactação das serragens, com o teor de umidade utilizado no processo (10% b.s.). A análise de poder calorífico superior dos briquetes foi realizada obedecendo à norma NBR 8633. Para realização das análises de PCS foram utilizados um calorímetro modelo C2000 e uma bomba calorimétrica modelo C500, ambos marca IKA.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização das serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*

A Tabela 1 apresenta os resultados do ensaio de densidade a granel das serragens nas condições em que foram coletadas.

Tabela 1 – Densidade a granel das serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*.
Table 1 - Bulk density of the sawdust of *Eucalyptus spp* and *Pinus sp*.

	<i>Densidade a granel (kg.m⁻³)</i>	
	<i>T.U.(%b.s.)</i>	
<i>Serragem de Eucalyptus sp</i>	58,46	228,31
<i>Serragem de Pinus sp</i>	81,57	272,76

Analisando os resultados da densidade a granel das serragens, observa-se que a serragem de *Pinus sp* apresentou maior teor de umidade (81,57%) que a serragem de *Eucalyptus sp* (58,46%), o que pode ter influenciado na densidade a granel das serragens, já que o *Pinus sp* apresentou densidade superior a do *Eucalyptus*



sp. A baixa densidade a granel dos resíduos podem tornar o seu transporte e armazenamento mais caro, inviabilizando sua utilização.

Os resultados da análise imediata da serragem de *Eucalyptus sp* e da serragem de *Pinus sp* são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise imediata das serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*.
Table 2 - Analysis of immediate sawdust of *Eucalyptus spp* and *Pinus sp*.

	<i>Teor de Umidade (%)</i>	<i>Teor de Voláteis (%)</i>	<i>Carbono Fixo (%)</i>	<i>Teor de Cinzas (%)</i>
<i>Serragem de Eucalyptus sp</i>	58,26	83,48	15,20	1,32
<i>Serragem de Pinus sp</i>	81,07	82,76	16,79	0,45

Os resultados de teor de umidade das serragens apresentaram valores muito superiores ao teor de umidade ideal, recomendados na literatura para a compactação, entre 8 e 12% (GROVER; MISHRA, 1996). Esses resultados indicam a necessidade de secagem dos resíduos, para que atinjam o teor de umidade ideal para a compactação.

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo obtidos para as serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* se encontram no intervalo determinado por Brito e Barrichello (1982), que preconizaram, em termos gerais, teores de matérias voláteis entre 75% a 85% e de carbono fixo entre 14% a 25% para a madeira.

O maior teor de carbono fixo encontrado na serragem de *Pinus sp* comparado ao do *Eucalyptus sp* pode estar relacionado ao maior teor de lignina insolúvel encontrado para este resíduo. De acordo com Brito e Barrichello (1977), a carbonização de um material lignocelulósico rico em lignina produz um carvão com alto teor de carbono fixo. Isto se deve a maior resistência à decomposição térmica que a lignina tem em relação aos outros componentes dos materiais lignocelulósicos. Combustíveis com alto índice de carbono fixo apresentam queima mais lenta, o que é vantajoso, devido ao maior tempo dentro das câmaras de combustão, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo (BRITO; BARRICHELO, 1982).

O maior teor de cinzas, encontrado na serragem de *Eucalyptus sp* (1,32%) pode inviabilizar a utilização deste resíduo como combustível em alguns sistemas de aquecimento, devido ao excesso de material residual ao fim da combustão, gerando uma maior manutenção. Por exemplo, de acordo com as normas europeias para *pellets*, o teor de cinzas máximo aceitável é de 0,5%, estando apenas a serragem de *Pinus sp* de acordo (0,45%).

Os resultados do teor de lignina Klason insolúvel presente nas serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Teor de lignina Klason insolúvel das serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*.
Table 3 - Content of insoluble Klason lignin from sawdust of *Eucalyptus spp* and *Pinus sp*.

Teor de lignina Klason insolúvel (%)	
<i>Serragem de Eucalyptus sp</i>	25,44
<i>Serragem de Pinus sp</i>	27,65

Observa-se que a serragem de *Pinus sp* apresentou maior teor de lignina insolúvel comparado a serragem de *Eucalyptus sp*, o que pode ser um ponto favorável para as propriedades energéticas do material.



Segundo Jara (1989), o poder calorífico superior da madeira, além da umidade, está muito influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lignina e extrativos.

No caso da compactação, o teor de lignina das serragens não influenciou na formação dos briquetes, pois não houve aquecimento no processo de compactação dos mesmos. Sem aquecimento a lignina não amolece, com isso não age como um aglutinante, favorecendo a adesão das partículas. Ainda que a serragem de *Pinus sp* tenha apresentado o maior percentual de lignina, os briquetes formados tiveram menor resistência à tração por compressão comparados aos briquetes de serragem de *Eucalyptus sp*.

Caracterização dos briquetes

Os briquetes produzidos a partir da compactação da serragem de *Eucalyptus sp* (SE) e serragem de *Pinus sp* (SP), apresentaram boa formação, como pode ser observado na Figura 2, que mostra os briquetes logo após a compactação.



Figura 2 – Briquetes produzidos a partir da compactação das serragens de *Eucalyptus sp* (SE) e *Pinus sp* (SP).

Figure 2 - Briquettes produced from the compression of sawdust of *Eucalyptus sp* (SE) and pine (SP).

A Tabela 4 apresenta os resultados da densidade aparente média dos briquetes, 72 horas após a compactação.

Tabela 4 - Densidade aparente média dos briquetes de serragens de *Eucalyptus sp* (SE) e *Pinus sp* (SP).

	<i>Densidade aparente média</i> (kg.m^{-3})	<i>Desvio Padrão</i>
<i>Briquetes SE</i>	871,84	7,15
<i>Briquetes SP</i>	852,54	2,64

Os valores da densidade aparente obtidos para os briquetes produzidos encontram-se abaixo dos valores indicados por Quirino e Brito (1991), entre 900 e 1000 kg.m^{-3} . Isso pode ter ocorrido devido a utilização de diferentes processos de compactação. A maior densidade aparente obtida (871,84 kg.m^{-3}) foi dos briquetes de serragem de *Eucalyptus sp* (*Briquetes SE*), comparado a densidade aparente dos briquetes de serragem de *Pinus sp* (*Briquetes SP*). A densidade aparente encontrada para os briquetes mostra a redução de volume que pode ser alcançada em relação à forma em que se encontravam os resíduos nas indústrias. A densidade a granel dos resíduos nas condições em que foram coletados era de 228,31 kg.m^{-3} para a serragem de *Eucalyptus sp* e de 272,76 kg.m^{-3} para a serragem de *Pinus sp*. Isso representa uma redução de volume de aproximadamente 4 vezes para o *Eucalyptus sp* e 3 vezes para o *Pinus sp*.



Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral dos briquetes das serragens de são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral dos briquetes de serragem de *Eucalyptus sp* (SE) e serragem de *Pinus sp*(SP).

Table 5 - Results of the tensile test by diametral compression of the briquettes from sawdust of *Eucalyptus sp* (SE) and pine sawdust (SP).

	<i>Tensão máxima média</i> (MPa)	<i>Desvio</i> <i>Padrão</i>	<i>Força máxima média</i> (kgf)	<i>Desvio</i> <i>Padrão</i>
<i>Briquetes SE</i>	1,01	0,04	86,92	3,25
<i>Briquetes SP</i>	0,45	0,02	38,53	1,69

Analisando os resultados do ensaio de tração por compressão diametral, verificamos que os briquetes de serragem de *Eucalyptus sp* (*Briquetes SE*) apresentaram maior resistência em comparação aos briquetes de serragem de *Pinus sp*(*Briquetes SP*). A baixa resistência dos briquetes de serragem de *Pinus sp* comparado ao de *Eucalyptus sp*, pode ter ocorrido devido a granulometria e o teor de umidade utilizados no processo não serem os ideais para a compactação da serragem do *Pinus sp*.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na análise de poder calorífico superior (PCS) dos briquetes de serragem de *Eucalyptus sp* (SE) e serragem de *Pinus sp* (SP).

Tabela 6 - Poder calorífico superior (PCS) dos briquetes.

Table 6 - calorific value (GCV) of the briquettes.

	<i>Poder calorífico superior</i>	
	<i>kcal.kg⁻¹</i>	<i>MJ.kg⁻¹</i>
<i>Briquetes S.E.</i>	4436	18,63
<i>Briquetes S.P.</i>	4675	19,64

O Poder calorífico superior (PCS) obtido para os briquetes estão próximos ao valor encontrado por Quirino et al. (2005), para briquetes de resíduos de madeira (4540 kcal.Kg⁻¹). Os briquetes que apresentaram maior PCS foram os briquetes de serragem de *Pinus sp*. O maior PCS obtido para os briquetes de *Pinus sp*, comparado aos briquetes de serragem de *Eucalyptus sp* pode estar relacionado ao maior teor de lignina encontrado para este resíduo.

CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que todos os materiais analisados podem ser utilizados na produção de briquetes. Foi possível a produção de briquetes de resíduos lignocelulósicos através do processo de compactação sem aquecimento. A compactação melhorou a qualidade dos biocombustíveis sólidos. Entre as serragens analisadas, a que apresentou as melhores propriedades químicas para a utilização como combustível sólido (maiores teores de lignina e carbono fixo e menores teores de voláteis e cinzas), foi a serragem de *Pinus sp*.



Como resultado, os briquetes de *Pinus sp* foram os que apresentaram o maior poder calorífico. Por outro lado, os briquetes que apresentaram maior resistência no ensaio de tração por compressão diametral foram os briquetes de serragem de *Eucalyptus sp*. Entretanto para afirmar uma boa resistência mecânica seria necessário a realização de outros ensaios mecânicos que possam simular as cargas e esforços sofridos pelos briquetes durante o processo de utilização desse biocombustível sólido.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e financiamento dos equipamentos (Projeto Universal – Edital MCT CNPq 15/2007).

Aos Professores Doutores Fábio Minoru Yamaji e Antonio José Felix de Carvalho, pelo apoio acadêmico e pela disponibilidade.

REFERÊNCIAS

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlação entre as características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 1 densidade e teor de lignina na madeira de eucalipto. IPEF, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS. São Paulo, p. 101-137, 1982.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. Biomass Briquetting: technology and practices, Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

LI, Y.; LIU, H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass and Bioenergy, v. 19, p. 177-186, 2000.

QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14p.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Brasília: Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. 1991. 16p.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. Revista da Madeira, n. 89, p. 100-106, 2005.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos florestais. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III. Rio Branco: Suprema. p. 195-241, 2008.

WAMUKONYA, L.; B. Durability and relaxation of sawdust and wheatstraw briquettes as possible fuels for Kenya. Biomass and Biomass, v. 8, n. 3, p. 175-179, 1995.